



• 研究报告 •

基于红外相机技术调查四川都江堰破碎化森林鸟兽多样性及优势种活动节律

赵坤明^{1,2}, 陈圣宾¹, 杨锡福^{2*}

1. 成都理工大学生态环境学院, 成都 610059; 2. 中国科学院动物研究所农业虫害鼠害综合治理研究国家重点实验室, 北京 100101

摘要: 生境破碎化对生物多样性的影响是当前生态学和保护生物学的重要研究内容之一。然而, 生境破碎化对物种多样性和活动节律影响的研究仍然不足。本研究于2018年7月至2021年7月在四川都江堰地区利用红外相机监测技术对21个破碎化森林斑块中的兽类、鸟类多样性进行调查, 以期了解破碎化森林中野生动物资源状况, 以及探明斑块大小、演替阶段对鸟兽多样性和优势种活动节律的影响。本研究鉴定出野生兽类和鸟类共63种, 隶属10目25科, 其中兽类11种, 鸟类52种。国家二级重点保护野生动物有藏酋猴(*Macaca thibetana*)、豹猫(*Prionailurus bengalensis*)、红腹锦鸡(*Chrysolophus pictus*)、红腹角雉(*Tragopan temminckii*)等12种, 中国特有动物有藏酋猴、小鹿(*Muntiacus reevesi*)、灰胸竹鸡(*Bambusicola thoracicus*)等7种。被IUCN濒危物种红色名录评估为易危(VU)的物种仅猪獾(*Arctonyx collaris*) 1种, 近危(NT)的有藏酋猴和毛冠鹿(*Elaphodus cephalophus*) 2种。兽类的物种数和相对多度随斑块大小增加而增加, 鸟类的物种数和相对多度与斑块大小之间没有显著相关性; 兽类、鸟类的物种数和相对多度与森林演替阶段之间没有显著相关性。鸟类的物种数和相对多度在旱季显著高于雨季, 兽类的相对多度在雨季明显高于旱季, 而兽类的物种数在旱季和雨季间没有显著差异。优势物种红腹锦鸡和灰胸竹鸡的日活动节律曲线高度重叠且无显著分化; 两种鸡形目物种的日活动节律重叠度随斑块大小的增大而增加, 随森林演替进行而降低, 与人为活动干扰在时间维度上存在明显的规避现象。结果表明, 生境破碎化主要影响兽类的物种多样性和优势鸟类的日活动节律。因此, 应加强运用红外相机等新技术对非保护区、非国家公园等破碎化生境内野生动物多样性的监测、研究和保护。该结果对进一步研究生境破碎化对生物多样性的影响及物种共存也具有一定的参考价值。

关键词: 生物多样性; 红外相机技术; 生境破碎化; 森林演替; 日活动节律; 生态位分化

赵坤明, 陈圣宾, 杨锡福 (2023) 基于红外相机技术调查四川都江堰破碎化森林鸟兽多样性及优势种活动节律. 生物多样性, 31, 22529. doi: 10.17520/biods.2022529.

Zhao KM, Chen SB, Yang XF (2023) Investigation of the diversity of mammals and birds and the activity rhythm of dominant species using camera trapping in a fragmented forest in the Dujiangyan region, Sichuan Province. Biodiversity Science, 31, 22529. doi: 10.17520/biods.2022529.

Investigation of the diversity of mammals and birds and the activity rhythm of dominant species using camera trapping in a fragmented forest in the Dujiangyan region, Sichuan Province

Kunming Zhao^{1,2}, Shengbin Chen¹, Xifu Yang^{2*}

1 College of Ecology and Environment, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059

2 State Key Laboratory of Integrated Management of Pest Insects and Rodents, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

ABSTRACT

Aims: The impacts of habitat fragmentation on biodiversity are a critical research area in ecology and conservation biology. However, there is still insufficient understanding of how habitat fragmentation affects species diversity and activity rhythm. The purpose of this study is to investigate the diversity of birds and animals in fragmented forests and

收稿日期: 2022-09-15; 接受日期: 2023-04-23

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0500105; 2017YFC0503802)和国家自然科学基金(32001123)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: yangxifu@ioz.ac.cn

to explore the effects of patch size and stand age on the diversity of mammals and birds, as well as the daily activity rhythm of dominant species.

Methods: From July 2018 to July 2021, researchers used infrared cameras to survey mammal and bird species in 21 fragmented forest patches located in the Dujiangyan region of Sichuan Province. The “vegan” package in R was used to generate the species accumulation curve; the linear mixed model of the “lme4” package in R was used to analyze the relationship between species richness and relative abundance index, and factors such as patch sizes, stand ages, and seasonal variations; the “overlap” package and “activity” package in R were used to analyze the daily activity rhythm and niche overlap of two dominant species and anthropogenic activities, through kernel density estimation and coefficient of overlap analyses.

Results: This study documented a total of 63 species of wild animals, which belonged to 10 orders and 25 families. These species included 52 species of birds and 11 species of mammals. Notably, 12 of the recorded species are Class-II national protected animals, such as *Macaca thibetana*, *Prionailurus bengalensis*, *Chrysolophus pictus*, and *Tragopan temminckii*; 7 species are endemic to China, including *M. thibetana*, *Muntiacus reevesi*, and *Bambusicola thoracicus*; 1 species (*Arctonyx collaris*) is red listed by the IUCN as Vulnerable (VU), and two species (*M. thibetana* and *Elaphodus cephalophus*) are listed as Near Threatened (NT). The research found that the species richness and relative abundance index of mammals increased as patch sizes increased. However, there was no significant correlation between bird species richness and relative abundance index, and patch sizes. Stand ages did not have significant correlations with the relative abundance index of mammals and birds. Furthermore, the study showed that the bird species richness and relative abundance index were significantly higher in the dry season than in the wet season. In contrast, the relative abundance index of mammals was significantly lower in the dry season than in the wet season, while mammal species richness did not significantly differ between the dry and wet season. The daily activity rhythm curves of the two dominant species (i.e., *C. pictus* and *B. thoracicus*) were highly overlapping and showed no significant niche differentiation; the overlap of daily activity rhythm increased as patch size but decreased with stand ages. In addition, the diurnal activity of the two dominant bird species showed a noticeable avoidance of anthropogenic activities during certain times.

Conclusion: Our findings indicate that forest fragmentation mainly affects mammal diversity and the daily activity rhythm of dominant birds. Therefore, it is crucial to enhance the use of new technologies such as infrared cameras to monitor, study and protect the diversity of wildlife in areas outside protected zones and national parks. Our results provide valuable insights for further studies on the impact of habitat fragmentation on biodiversity and species coexistence.

Key words: biodiversity; camera trapping; habitat fragmentation; forest succession; daily activity rhythm; niche differentiation

原始生境由于人为干扰或气候变化等因素影响逐渐破碎化成较小的斑块, 导致野生动物大量丧失, 生物多样性加速下降(Fahrig, 2003, 2017; Dirzo et al, 2014; Haddad et al, 2015)。因此, 开展破碎化森林野生动物多样性的监测和评估, 揭示生境破碎化对野生动物多样性和行为节律的影响, 具有重要的理论与实践意义(肖治术等, 2014a; Yang et al, 2018, 2022b; 陈立军等, 2019; 张尚明玉等, 2022)。

生境破碎化对生物多样性的影响十分复杂, 既有正面影响, 也有负面影响或无影响(Fahrig, 2003, 2013; Liu et al, 2019); 其影响包括多方面和多层次, 从个体、种群、群落到种间互作网络均会发生变化, 甚至影响整个生态系统功能(Haddad et al, 2015; Liu et al, 2019)。一般认为, 生境面积是影响物种生存的重要因素, 物种丰富度随生境面积增大而增加

(MacArthur & Wilson, 1963; Miller-Rushing et al, 2019)。森林演替过程会直接或间接影响动植物群落组成和物种分布, 进而导致群落结构和生态系统功能发生变化(Chazdon, 2008; Yang et al, 2018, 2022a)。在生境破碎化进程中, 森林面积减少以及斑块之间的隔离度逐渐增大, 阻碍了物种扩散和基因交流, 严重影响了鸟类、兽类等动物的物种丰富度和多度(Timo et al, 2015; Yang et al, 2018; 郑进凤等, 2021)。特别是对大型兽类, 由于其对生存和繁衍生境的要求较高, 如需要较大的栖息地和丰富的食物资源, 其在破碎化过程中受到的威胁最大, 可能面临局域灭绝的风险(Dirzo et al, 2014)。此外, 不同季节的气候变化(如降雨)差异明显, 不仅影响植物物候(Rafferty et al, 2020), 还会对动物多样性和分布产生很大的影响(Davies et al, 2011; Yang et al,

2022a)。虽然生境破碎化对鸟类或兽类物种丰富度和多度的影响得到了广泛关注(常家传等, 1997; Timo et al, 2015; Yang et al, 2018; 郑进凤等, 2021), 但是, 早期研究受调查方法的限制仍未能全面反映生境破碎化后斑块大小、演替阶段和季节因素对区域鸟类和兽类等野生动物多样性的影响。

动物的日活动节律是动物长期适应环境的结果, 是重要的生态行为特征(Kay et al, 2017)。日活动节律反映了动物一天的活动强度和行为规律, 受到日出日落、季节变化、种间相互作用以及人为活动干扰等影响(Nouvellet et al, 2012; Evens et al, 2020; 石江艳等, 2020)。在破碎化后的森林斑块中, 动物因生境面积较小、资源匮乏更易发生种间竞争(Yao et al, 2021; 周天祥等, 2022)。对于动物而言, 空间、时间和食物是最主要的生态位维度及限制因素(Schoener, 1974)。在空间和食物资源有限时, 同域分布的物种可能因时间生态位重叠而导致物种间的竞争。根据竞争排斥原理, 当空间生态位完全重叠时, 种间竞争能力较弱的物种会被排斥, 而在时间生态位上的分化有助于减少物种间竞争进而促进物种共存(Hardin, 1960)。在森林生态系统中, 鸡形目鸟类是其重要组成部分, 在维持生态系统的稳定方面发挥着重要的作用, 其生存状况一定程度上可以反映当地的生态环境健康程度(张正旺等, 2003)。由于较弱的飞行能力使其绝大部分行为都局限于地面生境, 难以在垂直空间上形成差异化的利用模式, 同域物种之间可能因获取食物资源而发生更为激烈的竞争, 被认为是检验生态位分化及探究同域物种共存机制的理想类群(陈立军等, 2019; Yao et al, 2021; 周天祥等, 2022)。此外, 鸡形目鸟类因体型小、迁移能力弱, 更容易受到破碎化斑块环境的影响和制约(胡远芳等, 2022)。破碎化森林不同的斑块大小和演替阶段具有不同的空间范围和生存资源, 对鸡形目鸟类形成的生存竞争压力也不同, 因此, 鸡形目鸟类在不同的斑块以何种模式共存对于探究破碎化森林动物日活动节律和生态位分化模式具有重要意义; 而且, 该研究也有助于揭示动物与其栖息生境之间的关系以及同域物种共存机制。

近20年来, 红外相机技术得到了快速发展, 已广泛应用于陆栖大中型兽类和鸟类的监测、保护与

管理中(Rowcliffe & Carbone, 2008; 李晟等, 2014; 肖治术等, 2022)。因其具有干扰小、成本低、全天候监测等优点(O'Brien et al, 2010; 肖治术等, 2014a), 受到科研人员、保护区管理人员等的广泛欢迎(谢文华等, 2014; 胡力等, 2016; 余建平等, 2019)。本研究在四川都江堰亚热带常绿阔叶林破碎化森林中, 利用红外相机监测技术对陆生大中型兽类和地栖鸟类多样性进行调查, 旨在: (1)监测和评估破碎化森林中野生动物资源状况; (2)探究斑块大小、演替阶段对兽类和鸟类物种数、相对多度的影响; (3)阐明斑块大小、演替阶段对优势鸡形目物种日活动节律的影响。研究结果有助于为生物多样性保护和森林管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

本研究在四川省都江堰市般若寺实验林场及其附近森林(103°42'–103°43' E, 31°04'–31°05' N, 海拔600–1,000 m, 总面积约为394 ha)进行。该区域属于中亚热带气候, 多云雾、少日照, 年平均气温为15℃, 年降水量为1,200–1,800 mm(陈昌笃, 2000)。全年降水量分布极不均匀, 降水主要集中在雨季(5–9月), 旱季(10月至翌年4月)降水量则较少(张知彬, 2019)。植被以常绿阔叶林为主, 常见树种有栎(*Quercus serrata*)、栓皮栎(*Q. variabilis*)、瓦山栲(*Castanopsis ceratacantha*)、栲树(*C. fargesii*)、米槠(*C. carlesii*)、大果冬青(*Ilex macrocarpa*)、灯台树(*Bothrocaryum controversum*)和油茶(*Camellia oleifera*)等。自20世纪70年代以来, 林场长期受人类活动(如砍伐、农业、建筑修建)的干扰, 已经发生了较为严重的破碎化, 残存森林呈现为具有不同演替阶段和面积大小的森林斑块(Yang et al, 2018)。

1.2 样地选择

为探究森林破碎化对大中型兽类和地栖鸟类物种丰富度和相对多度的影响, 本文于2018年7月选择前期进行植物群落调查和鼠类–种子互作网络研究的21个森林斑块(赵清建等, 2016; Yang et al, 2018)为红外相机监测样地, 各样地间被公路、水沟、农田等分隔。根据斑块面积大小将样地分为3类: 小斑块(< 8 ha, 8个)、中斑块(8–20 ha, 6个)和大斑块(> 20 ha, 7个)。根据人为干扰程度(如砍伐)将样

地分为3类演替阶段斑块: (1)演替早期斑块(< 20年, 11个), 过去20年间经历了较为严重的砍伐和破坏, 该林型中乔木较少, 主要以灌木和草本为主; (2)演替中期斑块(20–40年, 8个), 20世纪80–90年代经历了较为严重的砍伐和破坏, 并经过了20多年的植被演替, 该林型乔木层树木较多, 具有一定的郁闭度, 灌木和草本较多; (3)演替晚期斑块(> 90年, 2个), 受寺庙保护得以存留, 经历较少的干扰和破坏, 该林型树种丰富且多为年久高大的乔木, 中间夹杂少许灌木和草本(赵清建等, 2016; Yang et al, 2018)。

1.3 红外相机布设及数据采集

为确保每个斑块取样强度相同, 以及方便比较不同斑块类型中的物种数和相对多度指数。在所选择的21个斑块中各设置2个相机位点(即2台红外相机, 共42台相机, 相机型号为猎科Ltl-5210A, Ltl-5310W, 中国珠海市猎科电子有限公司), 以监测样区内的陆栖大中型兽类和鸟类物种。相机位点依据地形、植被、动物活动痕迹以及人为干扰因素等进行选择, 间隔100 m以上。相机安装在距地面约0.5 m的树干上, 使用防盗钢丝捆绑以防人为破坏和偷盗。镜头与地面大致平行, 保证相机视野开阔, 且要避免阳光直射以防相机误拍。安装之前检查相机功能是否完好, 设置日期、时间、照片编号和拍摄模式等信息。拍摄模式设置为拍照 + 摄像(连拍3张 + 10 s视频), 触发间隔时间1 s, 全天24 h工作。安装的同时详细记录相机位点的GPS信息(经度、纬度和海拔)和其他环境信息(坡度、坡向、植被情况、距水源距离和干扰因素等)。相机安装后每2个月检查1次并更换电池和存储卡, 自2018年7月到2021年7月共完成18次。由于相机受到亚热带高热高湿气候和人为因素的影响, 总共756个监测时段中有32个时段的相机丢失或损坏, 26个时段相机时间错误, 故在后续多样性分析中有效时段为724个, 日活动节律分析中有效时段为698个。

1.4 图像数据处理

所采集图像数据和位点详细信息均上传到图像数据管理系统CameraData (<http://www.gscloud.cn/cameradata/>) (肖治术等, 2014b), 各斑块每次采集数据的序列号分别按BRS-A-01–BRS-A-36、BRS-N-01–BRS-N-36等进行编号。通过CameraData对获得的照片和视频进行物种鉴定, 记录触发时

间、物种、数量、雌雄、成幼和行为等数据, 最后由系统直接导出为Excel数据表, 开展鸟兽物种名录编制和后续分析。兽类物种鉴定参考《中国兽类野外手册》(Smith和靳焱, 2009)和《中国哺乳动物多样性(第2版)》(蒋志刚等, 2017), 鸟类物种鉴定参考《中国鸟类分类与分布名录(第三版)》(郑光美, 2017)和《中国鸟类野外手册》(约翰·马敬能等, 2000)。动物的濒危等级参照IUCN濒危物种红色名录(<https://www.iucnredlist.org/>)和《中国脊椎动物红色名录》(蒋志刚等, 2016), 保护级别参照《国家重点保护野生动物名录》(http://www.gov.cn/xinwen/2021-02/09/content_5586227.htm)。

1.5 统计分析

在对红外相机图像数据进行分析时, 将一个相机位点30 min内连续拍摄到的同种多张有效照片或视频记为1张独立有效照片(O'Brien et al, 2003)。基于物种数与相机日数据, 利用R语言vegan包的specaccum函数绘制物种累积曲线, 以此拟合物种数与抽样强度之间的关系(Oksanen et al, 2022)。对物种有效捕获照片进行统计, 分别计算鸟类和兽类的相对多度指数(relative abundance index, RAI)以衡量研究区内鸟类和兽类的相对种群数量(O'Brien et al, 2003; 李晟等, 2016)。计算公式如下:

$$RAI = \frac{\sum_{i=1} N_i}{\sum_{i=1} Trapday_i} \times 1,000 \quad (1)$$

式中, N_i 为相机位点*i*拍摄的某一物种的独立有效照片数, $Trapday_i$ 为相机位点*i*的拍摄天数, 1,000表示每1,000个相机日所获取某一物种的独立有效照片数。

为确定生境破碎化后斑块大小和演替阶段对鸟类和兽类的物种数和相对多度的影响, 使用R语言线性混合模型lme4包和lmerTest包进行分析(Bates et al, 2015; Kuznetsova et al, 2017): 以物种数、相对多度指数为响应变量, 演替阶段和斑块大小为固定因素, 并考虑两者的交互效应(均没有显著差异), 年为随机因素。线性混合模型也用于分析季节因素(即雨季和旱季)对兽类和鸟类物种数和相对多度的影响: 以物种数、相对多度指数为响应变量, 季节为固定因素, 年为随机因素。

为探明生境破碎化对物种日活动节律和生态位分化的影响, 选取研究区域优势种中两种系统发

育关系较近的鸡形目物种进行日活动节律比较分析。动物日活动节律和生态位重叠程度以24 h数据类型为周期, 将独立有效照片的原始时间数据(时:分:秒)转为小数(数值范围0–1), 再转化为弧度数据, 最后采用核密度估计方法(kernel density estimation)分析物种间差异(Ridout & Linkie, 2009; 陈立军等, 2019)。利用R软件的overlap包overlapEst函数计算重叠系数(Δ , coefficient of overlap, 其值范围从0完全分化至1完全重叠) (Schmid & Schmidt, 2007; Meredith & Ridout, 2014), activity包中的compareCkern函数检验物种间活动节律差异性(Rowcliffe, 2016)。以上统计分析在R 4.1.2 (R Core Team, 2022)中完成。

2 结果

2.1 抽样评估

2018年7月至2021年7月在21个斑块42个监测位点累计监测时长为44,307个相机工作日, 共拍摄有效照片109,188张。其中, 兽类和鸟类的有效照片为101,567张, 人类和家畜的有效照片为7,621张。兽类独立有效照片为3,411张(组), 鸟类为13,591张(组)。物种累积曲线显示, 兽类、鸟类及总物种数均随相机工作日的增加而增加, 其中鸟类的增加趋势比兽类的更快(图1)。从取样饱和度来看, 兽类丰富度在1,500相机日时即趋于稳定, 表明取样充分; 鸟类丰富度前期增加幅度较快, 达到25,000相机日后趋于平缓(图1), 取样满足后续分析的要求。

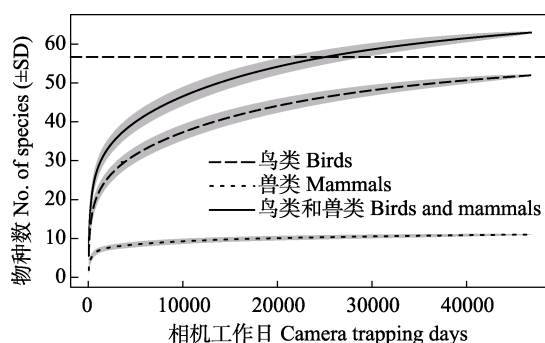


图1 四川都江堰研究区红外相机调查鸟类、兽类及总物种数随相机工作日的变化。最上方的水平虚线为记录的期望物种数达90% ($N = 57$)的参考线。

Fig. 1 Relationships of species richness of mammals, birds and the total of them with the camera trapping days in the Dujiangyan research region, Sichuan Province, China. The top horizontal dash line indicates 90% ($N = 57$) of the expected species richness recorded.

2.2 物种数和相对多度

共鉴定出63种野生动物, 包括鸟类52种, 兽类11种, 隶属于10目25科(附录1)。其中以雀形目最多, 达43种, 占总物种数的68.25%; 食肉目有5种, 鸡形目有4种, 鲸偶蹄目有3种, 鹰形目和啮齿目各有2种, 啄木鸟目、鸽形目、鸱形目和灵长目各1种。鸟类以留鸟为主(36种, 占总种数的69%), 其次为旅鸟9种(17%), 候鸟较少(夏候鸟3种, 冬候鸟3种)。

在IUCN濒危物种红色名录中被评估为易危(VU)级别的仅有猪獾(*Arctonyx collaris*), 近危(NT)级别的有藏酋猴(*Macaca thibetana*)和毛冠鹿(*Elaphodus cephalophus*)。在《中国脊椎动物红色名录》中列为易危(VU)的有4种, 分别为藏酋猴、豹猫(*Prionailurus bengalensis*)、毛冠鹿和小麝(*Moschus moschiferus*)。近危(NT)的物种有9种, 分别为红腹锦鸡(*Chrysolophus pictus*)、红腹角雉(*Tragopan temminckii*)、黑胸鸫(*Turdus dissimilis*)、画眉(*Garrulax canorus*)、短趾雕(*Circus gallicus*)、凤头鹰(*Accipiter trivirgatus*)、花面狸(*Paguma larvata*)、鼬獾(*Melogale moschata*)和猪獾。国家二级重点保护动物有12种, 分别为红腹锦鸡、红腹角雉、红喉歌鸲(*Calliope calliope*)、红嘴相思鸟(*Leiothrix lutea*)、画眉、橙翅噪鹛(*Trochalopteron elliotii*)、蓝鹇(*Emberiza siemsseni*)、短趾雕、凤头鹰、藏酋猴、豹猫和毛冠鹿(附录1)。

中国特有物种有7种, 分别为红腹锦鸡、灰胸竹鸡(*Bambusicola thoracicus*)、黄腹山雀(*Pardaliparus venustulus*)、橙翅噪鹛、蓝鹇、藏酋猴和小麝。鸟类相对多度指数较高的前3种分别为灰胸竹鸡(83.49)、红嘴相思鸟(58.34)和红腹锦鸡(56.38)。兽类相对多度指数较高的前3种分别为花面狸(25.71)、鼬獾(25.39)和小泡巨鼠(*Leopoldamys edwardsi*, 16.68)(附录1)。

2.3 斑块大小、演替阶段对鸟兽物种数和相对多度的影响

红外相机在不同斑块大小记录到的兽类物种数呈微显著差异($\chi^2 = 5.305$, $df = 2$, $P = 0.070$), 兽类相对多度指数差异显著($\chi^2 = 9.822$, $df = 2$, $P = 0.007$), 鸟类物种数和相对多度指数差异均不显著(均 $P > 0.05$)。组间比较结果显示, 随着斑块大小增加, 所记录到的兽类物种数和相对多度指数呈增加

的趋势; 大斑块监测到的鸟类相对多度指数高于小、中斑块, 鸟类物种数随斑块大小增加呈微下降趋势, 但组间均没有显著差异(图2A, C)。这些结果表明, 森林破碎化主要影响兽类的物种数和相对多度, 而对鸟类的物种数和相对多度影响较小。

红外相机在不同演替阶段记录到兽类和鸟类的物种数和相对多度指数差异均不显著(均 $P >$

0.05)。组间比较结果显示, 监测到的兽类物种数在演替早期斑块显著高于演替中期斑块($t = 2.112$, $df = 56$, $P = 0.039$), 所记录到的鸟类物种数随演替阶段增加而呈降低趋势; 兽类和鸟类的相对多度指数在不同演替阶段组间差异不显著(图2B, D)。这些结果表明, 演替阶段对兽类和鸟类的物种数和相对多度影响较小。

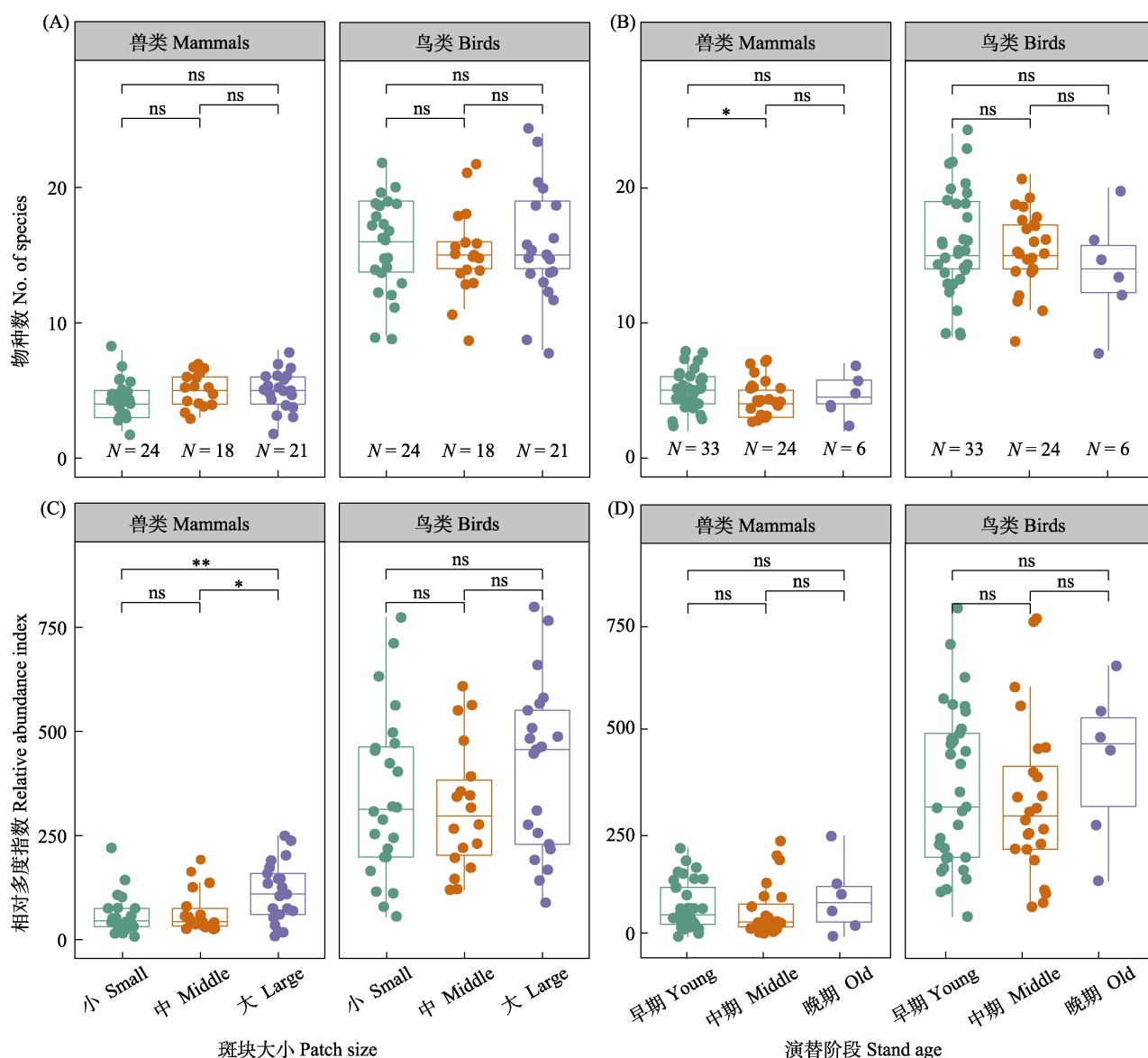


图2 斑块大小(A, C)和演替阶段(B, D)对鸟兽物种数和相对多度指数的影响。* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$; ns: 没有显著性差异。箱线图中, 箱体中间的横线表示中位数; 箱体高度表示25%–75%百分位数, 有50%的数据在此范围内; 箱体外的两条竖线表示除去异常值外的最大值和最小值; 线外的小圈表示异常值。图A和B中, N 表示样本大小(即斑块数)。

Fig. 2 Effects of patch size (A, C) and stand age (B, D) on species richness and relative abundance indices of birds and mammals. *, ** indicate $P < 0.05$, 0.01 , respectively, and ns indicates a non-significant effect ($P > 0.05$). The bottom and top limits of each box are the lower and upper quartiles, respectively; the horizontal line within each middle of box is the median. The two vertical lines outside the box represent the maximum and minimum values except for the outliers; the small circles outside the line represent the outliers. N in (A, B) indicated the sample size (i.e., patches).

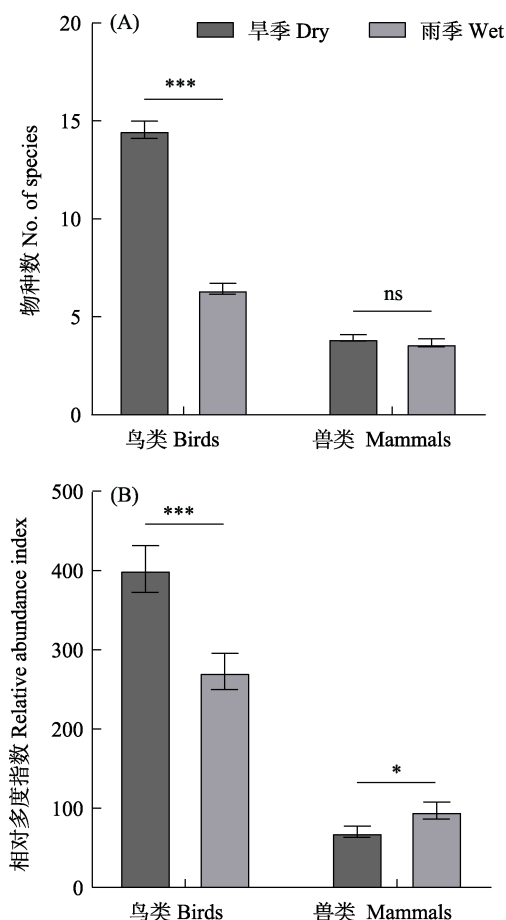


图3 季节(旱季、雨季)对鸟类、兽类物种数(A)和相对多度指数(B)的影响(平均值 \pm 标准误)。图中*, ***分别表示 $P < 0.05$, 0.001 ; ns表示没有显著性差异。

Fig. 3 Effects of seasons (dry season and wet season) on species richness (A) and relative abundance index (B) of birds and mammals (mean \pm SE). *, *** indicate $P < 0.05$, 0.001 , respectively, and ns indicates a non-significant effect ($P > 0.05$).

2.4 季节因素对鸟兽物种数和相对多度的影响

鸟类的物种数和相对多度指数在旱季均极显著高于雨季(物种数: $\chi^2 = 344.700$, $df = 1$, $P < 0.001$; 相对多度指数: $\chi^2 = 15.829$, $df = 1$, $P < 0.001$); 兽类相对多度指数在雨季显著高于旱季($\chi^2 = 4.703$, $df = 1$, $P = 0.030$), 但兽类的物种数在雨季和旱季间差异不显著($\chi^2 = 1.038$, $df = 1$, $P = 0.308$) (图3)。

2.5 斑块大小、演替阶段对两种优势鸡形目鸟类日活动节律的影响

监测期间共获得红腹锦鸡和灰胸竹鸡独立有效照片4,377张, 其中红腹锦鸡2,149张, 灰胸竹鸡2,228张。日活动节律表明, 红腹锦鸡和灰胸竹鸡均为昼行性物种, 2种鸟类的活动曲线高度重叠, 重叠

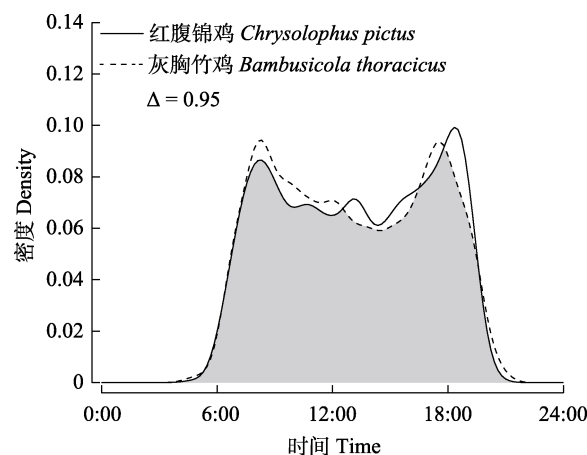


图4 红腹锦鸡和灰胸竹鸡的日活动节律曲线及重叠系数。灰色区域为重叠部分, 重叠系数为灰色区域的面积。
Fig. 4 The daily activity rhythm curve and coefficient of overlap of *Chrysolophus pictus* and *Bambusicola thoracicus*. The overlapping coefficient equals the area in grey below both curves.

系数为0.95, 日活动节律曲线差异不显著($\Delta = 0.95$, $P = 0.06$); 前者活动高峰在8:00–19:30之间, 后者在8:00和17:30出现2个活动高峰(图4)。

两种鸡形目鸟类日活动节律重叠度随斑块大小的增大而增加, 而随森林演替进行而降低(图5)。两种鸡形目鸟类在小、大斑块和演替阶段早期、中期的日活动节律重叠度高, 时间生态位无明显分化(均 $P > 0.05$); 而在中斑块、演替阶段晚期日活动重叠度较低, 时间生态位均出现显著分化(中斑块: $\Delta = 0.92$, $P = 0.024$; 晚期斑块: $\Delta = 0.77$, $P < 0.001$) (图5)。

研究区域内人为活动干扰(包括人类活动、放牧和家养动物活动等直接活动)独立有效照片为856张, 日活动节律曲线表明在10:00和15:00出现2个高峰。两种鸡形目鸟类的日活动节律与人为活动干扰的重叠度均较低, 且在时间维度均存在极显著分化(红腹锦鸡: $\Delta = 0.73$, $P < 0.001$; 灰胸竹鸡: $\Delta = 0.74$, $P < 0.001$) (图6)。红腹锦鸡和灰胸竹鸡的日活动节律与人为活动干扰比较, 发现两者均存在较为明显的错峰现象(图6)。

3 讨论

本研究基于红外相机技术对都江堰亚热带破碎化森林斑块中的大中型兽类和地栖鸟类多样性进行了调查。共鉴定出10目25科63种野生动物。其中, 记录到国家二级保护动物12种, 中国特有动物7

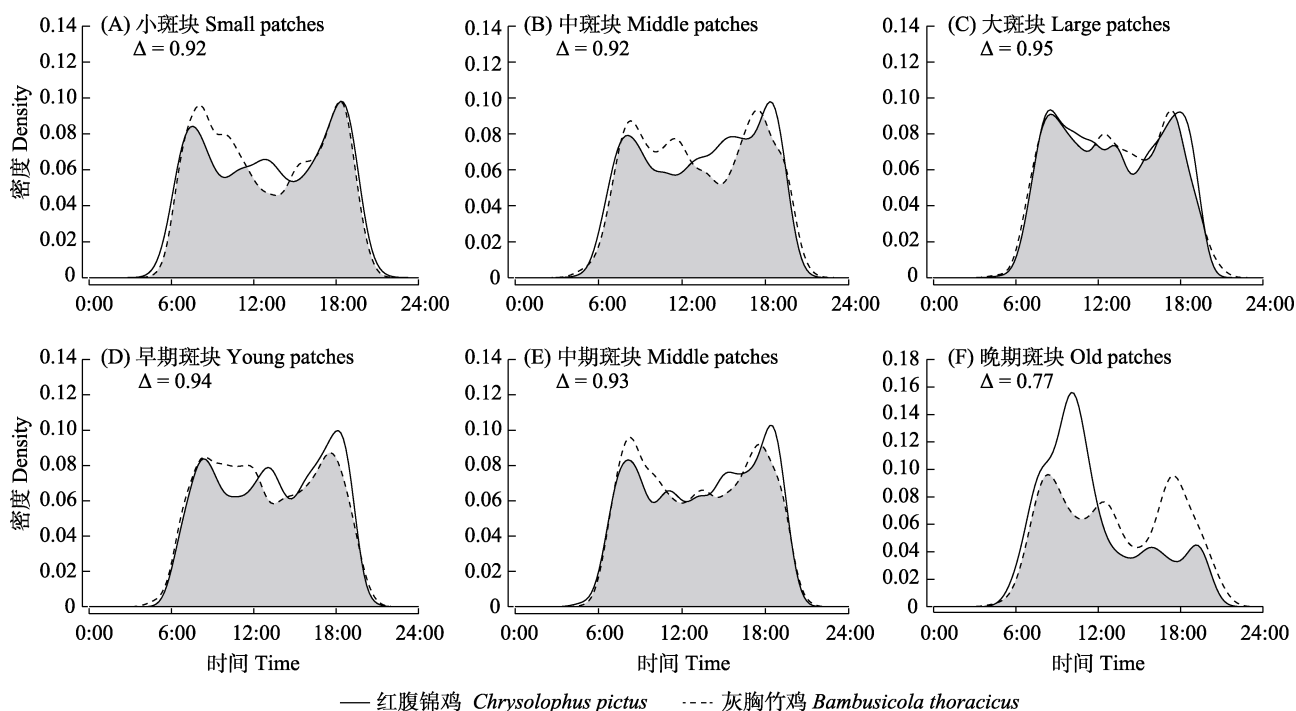


图5 红腹锦鸡和灰胸竹鸡在不同大小(A-C)和演替阶段(D-F)斑块中的日活动节律曲线及重叠系数。灰色区域为重叠部分, 重叠系数为灰色区域的面积。

Fig. 5 The daily activity rhythm curve and coefficient of overlap of *Chrysolophus pictus* and *Bambusicola thoracicus* in different patch sizes (A-C) and stand ages (D-F). The overlapping coefficient equals the area in grey below both curves.

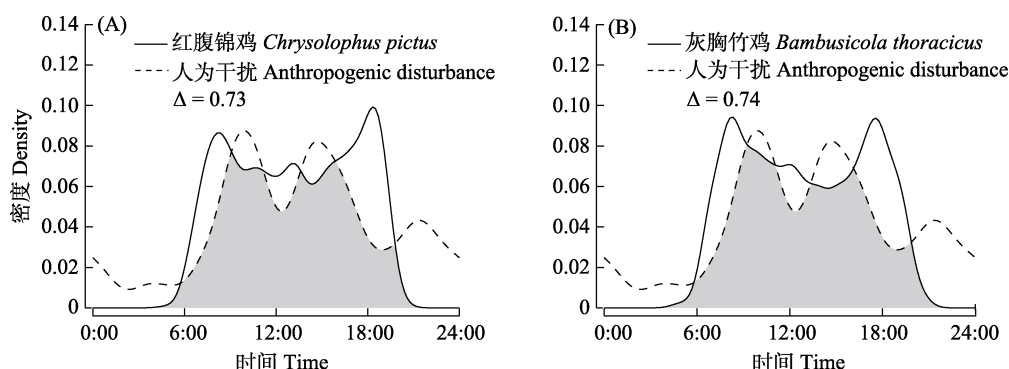


图6 红腹锦鸡(A)和灰胸竹鸡(B)与人为活动干扰的日活动节律曲线及重叠系数。灰色区域为重叠部分, 重叠系数为灰色区域的面积。

Fig. 6 The daily activity rhythm curve and coefficient of overlap of *Chrysolophus pictus* (A), *Bambusicola thoracicus* (B) and anthropogenic disturbance. The overlapping coefficient equals the area in grey below both curves.

种, 这些珍稀濒危和特有动物的存在说明都江堰地区有着丰富的野生动物资源(陈昌笃, 2000; 张尚明玉等, 2022)。斑块大小和演替阶段对兽类和鸟类的多样性与相对多度存在不同程度的影响。季节因素(即旱季和雨季)影响鸟类物种数和相对多度以及兽类的相对多度, 而对兽类物种数影响较小。优势物种红腹锦鸡和灰胸竹鸡具有较高的日活动节律重

叠度, 表明这两个物种在时间生态位上存在较大竞争, 且重叠度随斑块大小的增大而增加, 而随森林演替进行而降低; 两种鸡形目鸟类的日活动与人为活动干扰表现出明显的错峰活动现象。

3.1 破碎化森林中鸟兽多样性

陆栖大中型兽类和鸟类是生态系统中的重要组成部分, 对于生态系统的功能和稳定性有重要作

用(Berzaghi et al, 2018)。由于受到人为活动干扰、气候变化等因素的影响,相较于小型动物,大中型动物的灭绝风险更高(Dirzo et al, 2014)。基于红外相机对陆栖大中型兽类和鸟类的调查常在生物多样性丰富地区如自然保护区、国家公园进行(胡力等, 2016; 李晟等, 2016; 余建平, 2019),而在破碎化较为严重的林区较少。因为自然保护区、国家公园等在保护、维持生物多样性上更为重要,而非保护区、非国家公园等林区受到破碎化的影响更为严重,物种多样性受到的影响可能也更为严重。本研究表明,记录到的兽类物种数(11种)低于附近的龙溪-虹口国家级自然保护区(21种)(胡力等, 2016),鸟类物种数(52种)远低于都江堰地区的记录(311种)(张尚明玉等, 2022),表明破碎化森林中鸟兽多样性受到了不同程度的负面影响。红外相机记录到的鸟类主要为地栖性物种和在地面活动取食的共享物种(Li et al, 2020),物种累积曲线在达到25,000相机日后仍有缓慢增加,可能是由于相机偶尔拍摄到林冠层鸟类。红外相机记录到该研究区花面狸和鼬獾等中型动物相对多度较高,说明该破碎化森林经过多年禁伐管理(Yang et al, 2018),生境环境能较好满足中型动物的生存需求。然而,对于毛冠鹿、小鹿和野猪(*Sus scrofa*)等大型兽类,目前的生境面积和食物资源仍相对匮乏,种群繁衍困难导致数量稀少。因此,需要采取更好的措施加快破碎化森林的恢复或禁伐更长的时间。

3.2 生境破碎化对鸟兽物种数和相对多度的影响

岛屿生物地理学理论表明,栖息地(岛屿)面积越大,其所拥有的物种丰富度也越高(MacArthur & Wilson, 1963; Miller-Rushing et al, 2019)。本研究表明,兽类物种数和相对多度在大斑块高于小、中斑块,基本支持种-面积关系(MacArthur & Wilson, 1963)。但鸟类的物种数和相对多度与斑块大小之间关联不显著,可能与鸟类具有较强的飞行能力以及在不同的斑块之间来回迁移有关。小斑块的鸟类物种数和相对多度并不低,说明小斑块在生物多样性保护和研究中同样具有重要的作用(Riva & Fahrig, 2022)。森林破碎化不仅改变了斑块面积和隔离度,还会影响植被群落组成和分布,从而使斑块处于不同的演替阶段(Fahrig, 2003, 2017)。本研究表明,森林演替对兽类和鸟类的物种数和相

对多度影响均不显著。我们推测,由于演替晚期样区处在寺庙附近,虽然植被群落结构更复杂,但受到人为活动干扰的影响更加频繁,人类的活动可能影响了实验结果。前期研究表明,因人类活动干扰造成的生态位冗余为鼠类提供了开阔的栖息地和食物资源,导致鼠类物种数和多度在演替早、中期阶段高于演替晚期阶段(Yang et al, 2018, 2022a)。因此,鸟兽物种多样性是否与森林演替之间存在显著关联需要进一步研究。

3.3 季节因素对鸟兽物种数和相对多度的影响

前期研究表明气候变化会影响区域天气模式和植物物候(Rafferty et al, 2020),进而可能会影响动物行为和多样性(Davies et al, 2011; Yang et al, 2022a)。本研究中鸟类的物种数和相对多度在旱季显著高于雨季。这或许可以通过以下两方面的原因进行解释。首先,研究区10-12月大量的成熟果实(种子)掉落地面,吸引共享食果鸟类下地取食,如红嘴蓝鹊(*Urocissa erythrorhyncha*)、领雀嘴鹀(*Spizixos semitorques*)、白颊噪鹛(*Garrulax sannio*)、松鸦(*Garrulus glandarius*)等(姜明敏等, 2010; Li et al, 2020)。其次,红外相机图像资料显示在非果实期红嘴相思鸟等鸟类会在枯叶层寻找食物,加之旅鸟及冬候鸟(冬候鸟3种,旅鸟9种,旅鸟主要出现在旱季)在研究区的停留,三者共同促使旱季比雨季的鸟类物种数和相对多度更高。本研究中兽类的相对多度在雨季明显高于旱季,而兽类物种数在旱季和雨季之间没有显著差异。研究区雨季温度高、降水多、食物资源更加丰富,红外相机探测的图像资料发现兽类更多在雨夜活动,可能雨声为兽类夜间捕食起到掩护作用(贾晓东等, 2014)。研究区的4-5月为兽类繁殖期,兽类寻找配偶和觅食等活动更为频繁,因此,兽类在雨季被红外相机探测到的可能性也更高(刘明星等, 2021; 贾国清等, 2022)。

3.4 生境破碎化对动物日活动节律的影响

动物活动节律和时间生态位是动物行为在时间维度上的分布,是对时间资源利用的重要体现(Kay et al, 2017; 陈立军等, 2019)。对动物日活动节律的研究有助于了解动物在生境破碎化后的行为生态(Linkie & Ridout, 2011)和种间关系(Bu et al, 2016)。红腹锦鸡和灰胸竹鸡作为研究区内系统发育关系较近的优势物种,在食性和功能性状上具有较

高的相似性, 易因生态位重叠而发生竞争(Yao et al, 2021)。本研究结果表明, 红腹锦鸡和灰胸竹鸡的时间生态位在不同的演替阶段和斑块大小间重叠度均较高, 说明两者在斑块中存在较大竞争。斑块面积越小空间越狭窄可能竞争越大, 而随着斑块面积变大, 增加了物种活动空间, 两物种可能在空间生态位上产生分化而能稳定共存(Schoener, 1974)。随森林演替进行, 日活动节律重叠度逐渐降低进而出现时间生态位分化, 可能与斑块植物种子资源丰富度在演替早期较低而演替晚期较高有关(Yang et al, 2022a), 从而使两物种在食物生态位发生分离而稳定共存(Schoener, 1974)。两种鸡形目鸟类的日活动与人为活动干扰的重叠度较低, 且出现明显的错峰现象, 有效地避开了人类的活动高峰时间。这表明在人为活动干扰较高的区域, 红腹锦鸡和灰胸竹鸡可通过调节自身的日活动节律以规避人为活动干扰, 和许多野生动物适应人为干扰的表现相同(如石江艳等, 2020; 胡远芳等, 2022)。这些结果表明鸡形目鸟类在面对种间竞争和人为活动干扰时优先选择规避人类活动以降低被捕食风险。所以, 需采取更有效的措施加大对自然生境和动物本身的保护。


综上所述, 本研究利用红外相机技术首次调查了都江堰亚热带破碎化森林斑块中陆栖大中型兽类和地栖鸟类本底资源状况, 并分析了生境破碎化对兽类和鸟类多样性及优势种日活动节律的影响, 为破碎化生境野生动物监测和保护管理工作提供了重要的基础资料。通过为期3年的调查, 发现鸟类和兽类物种多样性远低于周边保护区, 大型兽类物种稀少; 生境破碎化对鸟兽丰富度和相对多度具有一定的负面影响。此外, 研究结果初步揭示了两种鸡形目鸟类在破碎化斑块中的共存机制, 为这两种珍稀雉类的保护及其生态学研究提供了重要的基础资料。然而, 值得注意的是, 红外相机技术在生物多样性调查中仍存在不足, 例如只适合拍摄在地面活动的鸟类和大中型兽类, 无法同时调查林冠层鸟类和兽类, 对夜行性小型兽类和冷血动物监测困难, 需要定期补充电源, 后期对大量影像中物种鉴定耗时费力(胡力等, 2016)。在当前抽样强度下鸟类物种仍有缓慢增加趋势, 说明长期监测有助于更为准确地对野生动物进行评估。另外, 物种习性如体型大小、食性对人为干扰的响应也是值得深入探究

的问题。建议在深入开展生境破碎化物种多样性研究时, 应适当增加相机数量和监测时长, 同时采取红外相机技术和其他方法相结合进行调查(张倩雯等, 2018; Yang et al, 2022b), 增加物种习性关联分析, 从而能更全面掌握野生动物资源状况, 为生物多样性保护和管理提供科学依据。

致谢: 本研究得到四川省都江堰市农业和林业局以及当地政府的大力支持, 野外调查工作得到了村民汪训龙帮助, 统计分析得到河北大学冯恩平的帮助, 在此一并致谢。

ORCID

赵坤明  <https://orcid.org/0000-0002-9696-6736>

杨锡福  <https://orcid.org/0000-0002-1070-0153>

参考文献

- Bates D, Mächler M, Bolker B, Walker S (2015) Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67, 1–48.
- Berzaghi F, Verbeeck H, Nielsen MR, Doughty CE, Bretagnolle F, Marchetti M, Scarascia-Mugnozza G (2018) Assessing the role of megafauna in tropical forest ecosystems and biogeochemical cycles—The potential of vegetation models. *Ecography*, 41, 1934–1954.
- Bu HL, Wang F, McShea WJ, Lu Z, Wang DJ, Li S (2016) Spatial co-occurrence and activity patterns of mesocarnivores in the temperate forests of Southwest China. *PLoS ONE*, 11, e0164271.
- Chang JC, Lu CH, Liu BW, Xu Q (1997) Study of the birds community structure in different succession period of Korean pine forest. *Chinese Journal of Ecology*, 16(6), 1–5. (in Chinese with English abstract) [常家传, 鲁长虎, 刘伯文, 许青 (1997) 红松林不同演替阶段夏季鸟类群落研究. *生态学杂志*, 16(6), 1–5.]
- Chazdon RL (2008) Beyond deforestation: Restoring forests and ecosystem services on degraded lands. *Science*, 320, 1458–1460.
- Chen CD (2000) The Dujiangyan Region—Pivot sector of assemblage, differentiation and maintenance of biodiversity in northern part of Hengduan Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 20, 28–34. (in Chinese with English abstract) [陈昌笃 (2000) 都江堰地区——横断山北段生物多样性交汇、分化和存留的枢纽地段. *生态学报*, 20, 28–34.]
- Chen LJ, Shu ZF, Xiao ZS (2019) Application of camera-trapping data to study daily activity patterns of Galliformes in Guangdong Chebaling National Nature Reserve. *Biodiversity Science*, 27, 266–272. (in Chinese with English abstract) [陈立军, 束祖飞, 肖治术 (2019) 应用红外相机数据研究动物活动节律——以广东车八岭

- 保护区鸡形目鸟类为例. 生物多样性, 27, 266–272.]
- Davies TJ, Buckley LB, Grenyer R, Gittleman JL (2011) The influence of past and present climate on the biogeography of modern mammal diversity. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 366, 2526–2535.
- Dirzo R, Young HS, Galetti M, Ceballos G, Isaac NJB, Collen B (2014) Defaunation in the Anthropocene. *Science*, 345, 401–406.
- Evens R, Kowalczyk C, Norevik G, Ulenaers E, Davaasuren B, Bayargur S, Artois T, Åkesson S, Hedenström A, Liechti F, Valcu M, Kempnaers B (2020) Lunar synchronization of daily activity patterns in a crepuscular avian insectivore. *Ecology and Evolution*, 10, 7106–7116.
- Fahrig L (2003) Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 34, 487–515.
- Fahrig L (2013) Rethinking patch size and isolation effects: The habitat amount hypothesis. *Journal of Biogeography*, 40, 1649–1663.
- Fahrig L (2017) Ecological responses to habitat fragmentation per se. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 48, 1–23.
- Haddad NM, Brudvig LA, Clobert J, Davies KF, Gonzalez A, Holt RD, Lovejoy TE, Sexton JO, Austin MP, Collins CD, Cook WM, Damschen EI, Ewers RM, Foster BL, Jenkins CN, King AJ, Laurance WF, Levey DJ, Margules CR, Melbourne BA, Nicholls AO, Orrock JL, Song DX, Townshend JR (2015) Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Science Advances*, 1, e1500052.
- Hardin G (1960) The competitive exclusion principle. *Science*, 131, 1292–1297.
- Hu L, Xie WH, Shang T, Jiang BK, Xiao ZS (2016) Preliminary survey for mammal and bird diversity using camera traps in the Longxi-Hongkou National Nature Reserve of Sichuan Province, Southwest China. *Acta Theriologica Sinica*, 36, 330–337. (in Chinese with English abstract) [胡力, 谢文华, 尚涛, 姜丙坤, 肖治术 (2016) 龙溪-虹口国家级自然保护区兽类和鸟类多样性红外相机调查结果初报. 兽类学报, 36, 330–337.]
- Hu YF, Li BQ, Liang D, Li XQ, Liu LX, Yang JW, Luo X (2022) Effect of anthropogenic disturbance on lady Amherst's pheasant (*Chrysolophus amherstiae*) activity. *Biodiversity Science*, 30, 21484. (in Chinese with English abstract) [胡远芳, 李斌强, 梁丹, 李兴权, 刘兰香, 杨家伟, 罗旭 (2022) 人为干扰对白腹锦鸡活动节律的影响. 生物多样性, 30, 21484.]
- Jia GQ, Yang X, Li YD, Wang Y, Zheng XA, Jiang Y, Yang B, Li SQ (2022) Comparison study on activity rhythms of sambar (*Cervus equinus*) and tufted deer (*Elaphodus cephalophus*) in the same region based on infrared camera data. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 43(2), 38–46. (in Chinese with English abstract) [贾国清, 杨旭, 李永东, 王宇, 郑笑傲, 蒋勇, 杨彪, 李生强 (2022) 同域分布水鹿和毛冠鹿活动节律的比较研究——基于红外相机数据. 四川林业科技, 43(2), 38–46.]
- Jia XD, Liu XH, Yang XZ, Wu PF, Songer M, Cai Q, He XB, Zhu Y (2014) Seasonal activity patterns of ungulates in Qinling Mountains based on camera-trap data. *Biodiversity Science*, 22, 737–745. (in Chinese with English abstract) [贾晓东, 刘雪华, 杨兴中, 武鹏峰, Melissa Songer, 蔡琼, 何祥博, 朱云 (2014) 利用红外相机技术分析秦岭有蹄类动物活动节律的季节性差异. 生物多样性, 22, 737–745.]
- Jiang MM, Cao L, Xiao ZS, Guo C (2010) Frugivorous birds and its impacts on seed dispersal of wild cherry (*Prunus pseudocerasus*) in a Dujiangyan forest, China. *Chinese Journal of Zoology*, 45(1), 27–34. (in Chinese with English abstract) [姜明敏, 曹林, 肖治术, 郭聪 (2010) 都江堰林区取食樱桃果实(种子)的鸟类及其种子扩散作用. 动物学杂志, 45(1), 27–34.]
- Jiang ZG, Jiang JP, Wang YZ, Zhang E, Zhang YY, Li LL, Xie F, Cai B, Cao L, Zheng GM, Dong L, Zhang ZW, Ding P, Luo ZH, Ding CQ, Ma ZJ, Tang SH, Cao WX, Li CW, Hu HJ, Ma Y, Wu Y, Wang YX, Zhou KY, Liu SY, Chen YY, Li JT, Feng ZJ, Wang Y, Wang B, Li C, Song XL, Cai L, Zang CX, Zeng Y, Meng ZB, Fang HX, Ping XG (2016) Red List of China's Vertebrates. *Biodiversity Science*, 24, 501–551. (in Chinese and in English) [蒋志刚, 江建平, 王跃招, 张鹗, 张雁云, 李立立, 谢锋, 蔡波, 曹亮, 郑光美, 董路, 张正旺, 丁平, 罗振华, 丁长青, 马志军, 汤宋华, 曹文宣, 李春旺, 胡慧建, 马勇, 吴毅, 王应祥, 周开亚, 刘少英, 陈跃英, 李家堂, 冯祚建, 王燕, 王斌, 李成, 宋雪琳, 蔡蕾, 臧春鑫, 曾岩, 孟智斌, 方红霞, 平晓鸽 (2016) 中国脊椎动物红色名录. 生物多样性, 24, 501–551.]
- Jiang ZG, Liu SY, Wu Y, Jiang XL, Zhou KY (2017) China's mammal diversity (2nd edition). *Biodiversity Science*, 25, 886–895. (in Chinese with English abstract) [蒋志刚, 刘少英, 吴毅, 蒋学龙, 周开亚 (2017) 中国哺乳动物多样性(第2版). 生物多样性, 25, 886–895.]
- Kay SL, Fischer JW, Monaghan AJ, Beasley JC, Boughton R, Campbell TA, Cooper SM, Ditchkoff SS, Hartley SB, Kilgo JC, Wisely SM, Wyckoff AC, VerCauteren KC, Pepin KM (2017) Quantifying drivers of wild pig movement across multiple spatial and temporal scales. *Movement Ecology*, 5, 14.
- Kuznetsova A, Brockhoff PB, Christensen RHB (2017) lmerTest package: Tests in linear mixed effects models. *Journal of Statistical Software*, 82, 1–26.
- Li HD, Tang LF, Jia CX, Holyoak M, Fründ J, Huang XQ, Xiao ZS (2020) The functional roles of species in metacommunities, as revealed by metanetwork analyses of bird-plant frugivory networks. *Ecology Letters*, 23, 1252–1262.
- Li S, Wang DJ, Bu HL, Liu XG, Jin T (2016) Camera-trapping survey on the mammal diversity in the Laohegou Nature Reserve, Sichuan Province. *Acta Theriologica Sinica*, 36, 282–291. (in Chinese with English abstract) [李晟, 王大军, 卜红亮, 刘小庚, 靳彤 (2016) 四川省老河沟自然保护区兽类多样性红外相机调查. 兽类学报, 36, 282–291.]

- Li S, Wang DJ, Xiao ZS, Li XH, Wang TM, Feng LM, Wang Y (2014) Camera-trapping in wildlife research and conservation in China: Review and outlook. *Biodiversity Science*, 22, 685–695. (in Chinese with English abstract) [李晟, 王大军, 肖治术, 李欣海, 王天明, 冯利民, 王云 (2014) 红外相机技术在我国野生动物研究与保护中的应用与前景. *生物多样性*, 22, 685–695.]
- Linkie M, Ridout MS (2011) Assessing tiger–prey interactions in Sumatran rainforests. *Journal of Zoology*, 284, 224–229.
- Liu JJ, Coomes DA, Gibson L, Hu G, Liu JL, Luo YQ, Wu CP, Yu MJ (2019) Forest fragmentation in China and its effect on biodiversity. *Biological Reviews*, 94, 1636–1657.
- Liu MX, Zhu BQ, Wang YJ, Zeren ZM, Fang C, Jin GX, Leng ZC, Guan TP, Sun ZY (2021) Activity rhythm and seasonal changes of *Elaphodus cephalophus* in Baihe National Nature Reserve, Sichuan Province. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 42(2), 27–32. (in Chinese with English abstract) [刘明星, 朱必清, 王语洁, 泽仁卓玛, 房超, 金贵祥, 冷志成, 官天培, 孙治宇 (2021) 四川白河国家级自然保护区毛冠鹿(*Elaphodus cephalophus*) 活动节律及季节变化. *四川林业科技*, 42(2), 27–32.]
- MacArthur RH, Wilson EO (1963) An equilibrium theory of insular zoogeography. *Evolution*, 17, 373–387.
- MacKinnon J, Phillipps K, He FQ (2000) A Field Guide to the Birds of China. Hunan Education Publishing House, Changsha. (in Chinese) [约翰·马敬能, 卡伦·菲利普斯, 何芬奇 (2000) 中国鸟类野外手册. 湖南教育出版社, 长沙.]
- Meredith M, Ridout M (2014) Overlap: Estimates of coefficient of overlapping for animal activity patterns. <https://CRAN.Rproject.org/package=overlap>. (accessed on 2022-04-07)
- Miller-Rushing AJ, Primack RB, Devictor V, Corlett RT, Cumming GS, Loyola R, Maas B, Pejchar L (2019) How does habitat fragmentation affect biodiversity? A controversial question at the core of conservation biology. *Biological Conservation*, 232, 271–273.
- Nouvellet P, Rasmussen GSA, Macdonald DW, Courchamp F (2012) Noisy clocks and silent sunrises: Measurement methods of daily activity pattern. *Journal of Zoology*, 286, 179–184.
- O'Brien TG, Baillie JEM, Krueger L, Cuke M (2010) The Wildlife Picture Index: Monitoring top trophic levels. *Animal Conservation*, 13, 335–343.
- O'Brien TG, Kinnaird MF, Wibisono HT (2003) Crouching tigers, hidden prey: Sumatran tiger and prey populations in a tropical forest landscape. *Animal Conservation*, 6, 131–139.
- Oksanen J, Simpson GL, Blanchet FG, Kindt R, Legendre P, Minchin PR, O'Hara RB, Solymos P, Stevens MHH, Szoecs E, Wagner H, Barbour M, Bedward M, Bolker B, Borcard D, Carvalho G, Chirico M, Caceres MD, Durand S, Evangelista HBA, FitzJohn R, Friendly M, Furneaux B, Hannigan G, Hill GO, Lahti L, Glinn DM, Ouellette MH, Cunha ER, Smith T, Stier A, Braak CJFT, Weedon J (2022) vegan: Community Ecology Package. R package version 2.6-2. <https://cran.r-project.org/package=vegan>. (accessed on 2022-04-07)
- R Core Team (2022) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>. (accessed on 2022-04-07)
- Rafferty NE, Diez JM, Bertelsen CD (2020) Changing climate drives divergent and nonlinear shifts in flowering phenology across elevations. *Current Biology*, 30, 432–441.
- Ridout MS, Linkie M (2009) Estimating overlap of daily activity patterns from camera trap data. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*, 14, 322–337.
- Riva F, Fahrig L (2022) Small patches are disproportionately important for biodiversity conservation, despite ecosystem decay. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1797451/v1>. (accessed on 2022-09-07)
- Rowcliffe JM, Carbone C (2008) Surveys using camera traps: Are we looking to a brighter future? *Animal Conservation*, 11, 185–186.
- Rowcliffe JM (2016) Activity: Animal Activity Statistics. <https://cran.r-project.org/package=activity>. (accessed on 2022-05-07)
- Schmid F, Schmidt R (2007) Multivariate extensions of Spearman's rho and related statistics. *Statistics & Probability Letters*, 77, 407–416.
- Schoener TW (1974) Resource partitioning in ecological communities. *Science*, 185, 27–39.
- Shi JY, Yang H, Hua JQ, Zhao YZ, Li JQ, Xu JL (2020) The relationship between the diurnal activity rhythm of Reeves's pheasant (*Syrnaticus reevesii*) and human disturbance revealed by camera trapping. *Biodiversity Science*, 28, 796–805. (in Chinese with English abstract) [石江艳, 杨海, 华俊钦, 赵玉泽, 李建强, 徐基良 (2020) 利用红外相机研究白冠长尾雉日活动节律与人为干扰的关系. *生物多样性*, 28, 796–805.]
- Smith AT, Xie Y (2009) A Guide to the Mammals of China. Hunan Education Publishing House, Changsha. (in Chinese) [Smith AT, 解焱 (2009) 中国兽类野外手册. 湖南教育出版社, 长沙.]
- Timo TP, Lyra-Jorge MC, Gheler-Costa C, Verdade LM (2015) Effect of the plantation age on the use of *Eucalyptus* stands by medium to large-sized wild mammals in south-eastern Brazil. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 8, 108–113.
- Xiao ZS, Li XH, Jiang GS (2014a) Applications of camera trapping to wildlife surveys in China. *Biodiversity Science*, 22, 683–684. (in Chinese) [肖治术, 李欣海, 姜广顺 (2014a) 红外相机技术在我国野生动物监测研究中的应用. *生物多样性*, 22, 683–684.]
- Xiao ZS, Wang XZ, Li XH (2014b) An introduction to CameraData: An online database of wildlife camera trap data. *Biodiversity Science*, 22, 712–716. (in Chinese with English abstract) [肖治术, 王学志, 李欣海 (2014b) 野生动物多样性监测图像数据管理系统CameraData介绍. *生物多样性*, 22, 712–716.]
- Xiao ZS, Xiao WH, Wang TM, Li S, Lian XM, Song DZ, Deng XQ, Zhou QH (2022) Wildlife monitoring and research

- using camera-trapping technology across China: The Current status and future issues. *Biodiversity Science*, 30, 22451. (in Chinese with English abstract) [肖治术, 肖文宏, 王天明, 李晟, 连新明, 宋大昭, 邓雪琴, 周岐海 (2022) 中国野生动物红外相机监测与研究: 现状及未来. *生物多样性*, 30, 22451.]
- Xie WH, Yang XF, Yu JJ, Li JN, Tao SL, Lu ZJ, Wang XZ, Xiao ZS (2014) A survey of mammals and birds using camera traps in Badagongshan Forest Dynamics Plot, Central China. *Biodiversity Science*, 22, 816–818. (in Chinese) [谢文华, 杨锡福, 于家捷, 李俊年, 陶双伦, 卢志军, 王学志, 肖治术 (2014) 运用红外相机对八大公山森林动态样地鸟兽的初步调查. *生物多样性*, 22, 816–818.]
- Yang XF, Gu HF, Zhao QJ, Zhu YL, Teng YW, Li Y, Zhang ZB (2022a) High seed diversity and availability increase rodent community stability under human disturbance and climate variation. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1068795.
- Yang XF, Han LL, Wang Y, Guo C, Zhang ZB (2022b) Revealing the real-time diversity and abundance of small mammals by using an Intelligent Animal Monitoring System (IAMS). *Integrative Zoology*, 17, 1121–1135.
- Yang XF, Yan C, Zhao QJ, Holyoak M, Fortuna MA, Bascompte J, Jansen PA, Zhang ZB (2018) Ecological succession drives the structural change of seed–rodent interaction networks in fragmented forests. *Forest Ecology and Management*, 419/420, 42–50.
- Yao HY, Wang PC, Davison G, Wang Y, McGowan PJK, Wang N, Xu JL (2021) How do snow partridge (*Lerwa lerwa*) and Tibetan snowcock (*Tetraogallus tibetanus*) coexist in sympatry under high-elevation conditions on the Qinghai-Tibetan Plateau? *Ecology and Evolution*, 11, 18331–18341.
- Yu JP, Wang JY, Xiao HY, Chen XN, Chen SW, Li S, Shen XL (2019) Camera-trapping survey of mammalian and avian biodiversity in Qianjiangyuan National Park, Zhejiang Province. *Biodiversity Science*, 27, 1339–1344. (in Chinese with English abstract) [余建平, 王江月, 肖惠芸, 陈小南, 陈声文, 李晟, 申小莉 (2019) 利用红外相机公里网格调查钱江源国家公园的兽类及鸟类多样性. *生物多样性*, 27, 1339–1344.]
- Zhang QW, Gong YN, Song XJ, Wang XC, Yang CT, Shu ZF, Zou FS (2018) Comparing the effectiveness of camera trapping to traditional methods for biodiversity surveys of forest birds. *Biodiversity Science*, 26, 229–237. (in Chinese with English abstract) [张倩雯, 龚粤宁, 宋相金, 王新财, 杨昌腾, 束祖飞, 邹发生 (2018) 红外相机技术与其他几种森林鸟类多样性调查方法的比较. *生物多样性*, 26, 229–237.]
- Zhang SMY, He XC, Wang Y, Wang BY, He QY, Zhang YT, Wang B, Zhang K, Hu L, Shang T, Zhu M, Wu YJ (2022) Diversity of birds in breeding season of Dujiangyan. *Biodiversity Science*, 30, 21329. (in Chinese with English abstract) [张尚明玉, 何兴成, 王燕, 王贝爻, 何倩芸, 张怡田, 王彬, 张凯, 胡力, 尚涛, 朱敏, 吴永杰 (2022) 都江堰地区繁殖期鸟类多样性. *生物多样性*, 30, 21329.]
- Zhang ZB (2019) Studies on the Rodent–Seed Interactions of Forest Ecosystems: Exploring the Secrets of Cooperation Between Antagonists. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张知彬 (2019) 森林生态系统鼠类与植物种子关系研究: 探索对抗者之间合作的秘密. 科学出版社, 北京.]
- Zhang ZW, Ding CQ, Ding P, Zheng GM (2003) The current status and a conservation strategy for species of Galliformes in China. *Biodiversity Science*, 11, 414–421. (in Chinese with English abstract) [张正旺, 丁长青, 丁平, 郑光美 (2003) 中国鸡形目鸟类的现状与保护对策. *生物多样性*, 11, 414–421.]
- Zhao QJ, Gu HF, Yan C, Cao K, Zhang ZB (2016) Impact of forest fragmentation on rodent–seed network. *Acta Theriologica Sinica*, 36, 15–23. (in Chinese with English abstract) [赵清建, 顾海峰, 严川, 曹科, 张知彬 (2016) 森林破碎化对鼠类–种子互作网络的影响. *兽类学报*, 36, 15–23.]
- Zheng GM (2017) A Checklist on the Classification and Distribution of the Birds of China, 3rd edn. Science Press, Beijing. (in Chinese) [郑光美 (2017) 中国鸟类分类与分布名录(第三版). 科学出版社, 北京.]
- Zheng JF, Tang R, He S, Chen YH, Wu S, Zhang K, Xu Y, Zou X (2021) Bird diversity and nestedness on fragmented woodlots in Huaxi University Town, Guizhou Province. *Biodiversity Science*, 29, 661–667. (in Chinese with English abstract) [郑进凤, 唐蓉, 贺霜, 陈月红, 伍素, 张凯, 徐雨, 邹晓 (2021) 贵州花溪大学城破碎化林地鸟类多样性与嵌套分布格局. *生物多样性*, 29, 661–667.]
- Zhou TX, Yang HL, Zhang GQ, Yang J, Feng X, Hu Q, Cheng YH, Zhang JD, Wang B, Zhou CQ (2022) Temporal and spatial niche differentiation among three alpine Galliformes with sympatric distribution in the Wolong National Nature Reserve, Sichuan Province. *Biodiversity Science*, 30, 22026. (in Chinese with English abstract) [周天祥, 杨华林, 张贵权, 杨建, 冯茜, 胡强, 程跃红, 张晋东, 王彬, 周材权 (2022) 四川卧龙国家级自然保护区三种高山同域鸡形目鸟类的时空生态位比较. *生物多样性*, 30, 22026.]

(责任编辑: 蒋学龙 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 都江堰研究区红外相机监测记录到的鸟兽物种名录

Appendix 1 Mammal and bird species recorded by camera-trapping in the Dujiangyan research region, Sichuan Province, China
<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2022529-1.pdf>

赵坤明, 陈圣宾, 杨锡福 (2023) 基于红外相机技术调查四川都江堰破碎化森林鸟兽多样性及优势种活动节律. 生物多样性, 31, 22529.
<https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2022529>

附录1 都江堰研究区红外相机监测记录到的鸟兽物种名录
Appendix 1 Mammal and bird species recorded by camera-trapping in the Dujiangyan research region, Sichuan Province, China

物种 Species	国家重点 保护野生 动物名录 Protection category	中国脊椎动 物红色名录 Red List of China's Vertebrates	IUCN濒危 级别 IUCN Red List of Threatened Species	居留型 Residential type	斑块数量 No. of detected locations	独立有效照 片数 No. of independent photographs	相对多度 指数 Relative abundance index
鸟类 Birds							
鸽形目 COLUMBIFORMES							
鸫鸽科 Columbidae							
山斑鸠 <i>Streptopelia orientalis</i>		LC	LC	R	3	5	0.11
鹑形目 CHARADRIIFORMES							
鹑科 Scolopaciidae							
丘鹑 <i>Scolopax rusticola</i>		LC	LC	W	18	241	5.44
鸡形目 GALLIFORMES							
雉科 Phasianidae							
红腹锦鸡 <i>Chrysolophus pictus</i> ▲	II	NT	LC	R	21	2,498	56.38
灰胸竹鸡 <i>Bambusicola thoracicus</i> ▲		LC	LC	R	21	3,699	83.49
红腹角雉 <i>Tragopan temminckii</i>	II	NT	LC	R	1	2	0.05
环颈雉 <i>Phasianus colchicus</i>		LC	LC	R	3	4	0.09
雀形目 PASSERIFORMES							
长尾山雀科 Aegithalidae							
黑眉长尾山雀 <i>Aegithalos bonvaloti</i>		LC	LC	R	1	2	0.05
红头长尾山雀 <i>Aegithalos concinnus</i>		LC	LC	R	6	13	0.29
莺鹟科 Sylviidae							
红嘴鸦雀 <i>Conostoma aemodium</i>		LC	LC	R	3	3	0.07
灰头鸦雀 <i>Psittiparus gularis</i>		LC	LC	R	1	1	0.02
鹎科 Pycnonotidae							
领雀嘴鹎 <i>Spizixos semitorques</i>		LC	LC	R	2	4	0.09
鸫科 Turdidae							
淡背地鸫 <i>Zoothera mollissima</i>		LC	LC	S	15	38	0.86
黑胸鸫 <i>Turdus dissimilis</i>		NT	LC	P	1	1	0.02
虎斑地鸫 <i>Zoothera aurea</i>		LC	LC	P	21	1,557	35.14
灰翅鸫 <i>Turdus bouboul</i>		LC	LC	S	21	571	12.89
乌鸫 <i>Turdus mandarinus</i>		LC	LC	R	5	37	0.84
乌灰鸫 <i>Turdus cardis</i>		LC	LC	P	4	13	0.29
长尾地鸫 <i>Zoothera dixonii</i>		LC	LC	P	19	119	2.69
灰背鸫 <i>Turdus hortulorum</i>		LC	LC	P	2	6	0.14
灰头鸫 <i>Turdus rubrocanus</i>		LC	LC	R	3	4	0.09
林鹟科 Timaliidae							
斑胸钩嘴鹟 <i>Erythrogenys gravivox</i>		LC	LC	R	16	159	3.59
棕颈钩嘴鹟 <i>Pomatorhinus ruficollis</i>		LC	LC	R	18	76	1.72
红头穗鹟 <i>Cyanoderma ruficeps</i>		LC	LC	R	13	27	0.61
山雀科 Paridae							
黄腹山雀 <i>Pardaliparus venustulus</i> ▲		LC	LC	R	2	2	0.05
黑冠山雀 <i>Periparus rubidiventris</i>		LC	LC	R	1	3	0.07
火冠雀 <i>Cephalopyrus flammiceps</i>		LC	LC	R	5	5	0.11
煤山雀 <i>Periparus ater</i>		LC	LC	P	3	3	0.07
雀科 Passeridae							
麻雀 <i>Passer montanus</i>		LC	LC	R	4	5	0.11
石雀 <i>Petronia petronia</i>		LC	LC	W	1	2	0.05

赵坤明, 陈圣宾, 杨锡福 (2023) 基于红外相机技术调查四川都江堰破碎化森林鸟兽多样性及优势种活动节律. 生物多样性, 31, 22529. <https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2022529>

物种 Species	国家重点 保护野生 动物名录 Protection category	中国脊椎动 物红色名录 Red List of China's Vertebrates	IUCN濒危 级别 IUCN Red List of Threatened Species	居留型 Residential type	斑块数量 No. of detected locations	独立有效照 片数 No. of independent photographs	相对多度 指数 Relative abundance index
鹟科 Muscicapidae							
红胁蓝尾鸲 <i>Tarsiger cyanurus</i>		LC	LC	R	21	237	5.35
紫啸鸫 <i>Myophonus caeruleus</i>		LC	LC	R	21	1,297	29.27
白额燕尾 <i>Enicurus leschenaulti</i>		—	LC	R	1	2	0.05
红喉歌鸲 <i>Calliope calliope</i>	II	LC	LC	P	1	2	0.05
栗腹歌鸲 <i>Larvivora brunnea</i>		LC	LC	S	2	5	0.11
蓝歌鸲 <i>Larvivora cyane</i>		LC	LC	P	12	60	1.35
鸦科 Corvidae							
红嘴蓝鹊 <i>Urocissa erythrorhyncha</i>		LC	LC	R	21	473	10.68
松鸦 <i>Garrulus glandarius</i>		LC	LC	R	19	268	6.05
幽鹞科 Pellorneidae							
灰眶雀鹛 <i>Alcippe morrisonia</i>		LC	LC	R	16	82	1.85
褐顶雀鹛 <i>Schoeniparus brunneus</i>		LC	LC	R	14	51	1.15
噪鹛科 Leiothrichidae							
白喉噪鹛 <i>Garrulax albogularis</i>		LC	LC	R	2	9	0.20
白颊噪鹛 <i>Garrulax sannio</i>		LC	LC	R	21	1,256	28.35
红嘴相思鸟 <i>Leiothrix lutea</i>	II	LC	LC	R	21	2,585	58.34
画眉 <i>Garrulax canorus</i>	II	NT	LC	R	8	24	0.54
灰翅噪鹛 <i>Garrulax cineraceus</i>		LC	LC	R	15	179	4.04
橙翅噪鹛 <i>Trochalopteron elliotii</i> ▲	II	LC	LC	R	12	38	0.86
黑顶噪鹛 <i>Trochalopteron affine</i>		LC	LC	R	1	1	0.02
燕雀科 Fringillidae							
灰头灰雀 <i>Pyrrhula erythaca</i>		LC	LC	R	1	1	0.02
燕雀 <i>Fringilla montifringilla</i>		LC	LC	W	2	15	0.34
鹀科 Emberizidae							
蓝鹀 <i>Emberiza siemsseni</i> ▲	II	LC	LC	S	2	6	0.14
鹰形目 ACCIPITRIFORMES							
鹰科 Accipitridae							
短趾雕 <i>Circetus gallicus</i>	II	NT	LC	P	3	3	0.07
凤头鹰 <i>Accipiter trivirgatus</i>	II	NT	LC	R	2	2	0.05
啄木鸟目 PICIFORMES							
啄木鸟科 Picidae							
灰头绿啄木鸟 <i>Picus canus</i>		LC	LC	R	21	333	7.52
兽类 Mammals							
灵长目 PRIMATES							
猴科 Cercopithecidae							
藏酋猴 <i>Macaca thibetana</i> ▲	II	VU	NT		1	1	0.02
食肉目 CARNIVORA							
灵猫科 Viverridae							
花面狸 <i>Paguma larvata</i>		NT	LC		21	1,139	25.71
猫科 Felidae							
豹猫 <i>Prionailurus bengalensis</i>	II	VU	LC		18	105	2.39
鼬科 Mustelidae							
黄鼬 <i>Mustela sibirica</i>		LC	LC		21	162	3.66
鼬獾 <i>Melogale moschata</i>		NT	LC		21	1,125	25.39
猪獾 <i>Arctonyx collaris</i>		NT	VU		11	59	1.33
鲸偶蹄目 CETARTIODACTYLA							

赵坤明, 陈圣宾, 杨锡福 (2023) 基于红外相机技术调查四川都江堰破碎化森林鸟兽多样性及优势种活动节律. 生物多样性, 31, 22529.
<https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2022529>

物种 Species	国家重点 保护野生 动物名录 Protection category	中国脊椎动 物红色名录 Red List of China's Vertebrates	IUCN濒危 级别 IUCN Red List of Threatened Species	居留型 Residential type	斑块数量 No. of detected locations	独立有效照 片数 No. of independent photographs	相对多度 指数 Relative abundance index
鹿科 Cervidae							
毛冠鹿 <i>Elaphodus cephalophus</i>	II	VU	NT		11	149	3.36
小鹿 <i>Muntiacus reevesi</i> ▲		VU	LC		3	9	0.20
野猪 <i>Sus scrofa</i>		LC	LC		2	2	0.05
啮齿目 RODENTIA							
松鼠科 Sciuridae							
隐纹花鼠 <i>Tamias swinhoi</i>		LC	LC		4	11	0.25
鼠科 Muridae							
小泡巨鼠 <i>Leopoldamys edwardsi</i>		LC	LC		21	739	16.68

此表未包括不能鉴定出具体物种的鸟兽。▲ 中国特有物种; 保护等级: II: 国家二级重点保护野生动物; IUCN/中国脊椎动物红色名录: VU: 易危; NT: 近危; LC: 无危; 居留型: R: 留鸟; S: 夏候鸟; W: 冬候鸟; P: 旅鸟。
This table did not include the mammals and birds which can not be identified as specific species; ▲ Endemic species in China; Protection category: II, Class II nationally key protected wildlife; IUCN/Red List of China's Vertebrates: VU, Vulnerable; NT, Near Threatened; LC, Least Concern; Occurrence status: R, Resident; S, Summer visitor; W, Winter visitor; P, Passage migrant.